**1. Wstęp**

W odróżnieniu do badań przeprowadzanych pod koniec XX wieku, które wymagały skomplikowanego toru audio oraz zwykle potrzeby wykorzystania pola swobodnego oraz dyfuzyjnego do wykonywania testów, teraźniejsze możliwości znacznie to ułatwiają. Przede wszystkim możliwość odwzorowania większości zjawisk w domenie cyfrowej, jak i znacznie ułatwiające badania nieporównywalnie większe możliwości obliczeniowe. W literaturze z tego okresu można zaobserwować obszerne opisy dotyczące przygotowania warunków, które było niezbędne to wykonania badań. W odróżnieniu do tej sytuacji, w przypadku potrzeby dokonania niewielkiej zmiany w parametrach, jedyne niezbędne czynności do wykonania to niewielka modyfikacja kodu oraz odczekanie niewielkiej ilości czasu w celu otrzymania nowo skompilowanej aplikacji. O wiele mniejsze możliwości obliczeniowe w tamtych czasach skutkowały także bardzo częstym i popularnym podejściem subiektywnym do problemu klasyfikacji i oceny zjawisk akustycznych. W dzisiejszych czasach wciąż istnieje bardzo duża liczba zjawisk trudnych do obiektywnego opisu, jednak szybkość obliczeń pozwala na większą ilość testów w tym samym czasie, a co za tym idzie łatwość opisu - teraźniejsze warunki zdecydowanie to ułatwiają.

*W pionierskiej pracy Schroedera z 1962 roku [4] zostają poruszone fundamentalne dziś zasady, na który opiera się większość systemów i architektur implementacyjnch sztucznych pogłosów. Problemy rozwiązywane wtedy wymagały o wiele więcej pracy (dostosowanie czasu*

**2. Cel i zakres pracy**

Celem jest również próba obiektywizacji parametrów pojawiających się w literaturze jako zjawiska subiektywne.

**5. Testy aktualnie stosowanych rozwiązań implementacji pogłosu**

Od wczesnych lat rozwoju prac nad implementacją sztucznego pogłosu, najbardziej popularne jest rozgraniczenie go na dwie części: pierwsze odbicia (pierwsze około 80 ms) oraz późny pogłos (pozostała część pogłosu) [1], [2]. Pierwsze odbicia to część pogłosu złożona z dyskretnych odbić imitujących wczesne odbicia od ścian lub innych elementów w pomieszczeniu. Czas opóźnienia w stosunku do dźwięku bezpośredniego oraz stosunki amplitud wczesnych odbić zależą w głównej mierze od kształtu pomieszczenia i pozycji źródła względem odbiornika. Odbicia te odgrywają główną rolę w subiektywnym odczuciu przestrzenności dźwięku. Pomagają więc w lokalizacji źródła dźwięku przez odbiorcę. Późny pogłos, w odróżnieniu od pierwszych odbić jest niezależny od położenia źródła dźwięku i odbiornika - jest silnie zależny od geometrii pomieszczenia oraz właściwości pochłaniających i rozpraszających materiałów elementów w nim się znajdujących. W celu zaprojektowania algorytmu sztucznego pogłosu Jot [1] proponuje procedurę przyjęcia odpowiednich parametrów, aby uzyskać końcowy efekt w postaci sygnału 'mono’, co w praktyce odpowiada sygnałowi o identycznej zawartości dla wszystkich kanałów. Następnie, należy rozważyć zjawiska binauralne oraz inne rozwiązania w celu nadania pogłosowi realizmu.

*Pomimo obecności w literaturze w większości opisu subiektywnego,* W celu ograniczenia wyboru metod na podstawie subiektywnych wrażeń słuchowych, przeprowadzono analizę właściwości sygnałów za pomocą zaproponowanych obiektywnych parametrów.

*W sytuacjach porównywania subiektywnego metoda samobadawcza została przyjęta, ze względu na fakt wygody przygotowania badania oraz najkrótszy czas badań.*

[4] Na podstawie badań wykazano, że pogłos oparty na sieci linii opóźniających nie jest subiektywnie rozróżnialny z pogłosem z rzeczywistych pomieszczeń. Badania wskazały, iż zjawisko zachodzi dla nie tylko sygnałów takich jak mowa czy muzyka, ale także dla bardzo krótkich odcinków szerokopasmowego szumu Gaussa. *Ze względu na ten fakt wybrano ten sygnał do testów.*

**5.1. Wzmocnienia linii opóźniających i poszczególnych odbić/symulacja tłumienia składowych pogłosu**

*Symulacja pierwszych odbić: 3 odbicia – jedno z lewej, drugie z prawo, trzecie od przodu czyli oba kanały. Stosunki ich amplitud. Wykażę tutaj, że różna amplituda dla lewego i prawego ucha skutkuje większą przestrzennością.*

Barron [2] zwrócił uwagę, że czas pogłosu nie jest jedynym wyznacznikiem jakości dźwięku w pomieszczeniu. Przeprowadził badania mające na celu zrozumienie jak ważny przy modelowaniu sztucznego pogłosu jest wpływ pierwszych odbić. Badania te polegały na analizie subiektywnych wrażeń osób badanych, którym przedstawiane były próbki dźwiękowe zawierające pogłos o różnych parametrach. Został zbadany między innymi wpływ pierwszych odbić bocznych na subiektywne zjawisko ‘wrażenia przestrzenności’ pogłosu. To zaobserwowane zjawisko miało wynikać z właściwości wczesnych odbić bocznych w pomieszczeniu (10 – 80ms). Na podstawie jego badań został także wysunięty wniosek, iż wrażenie przestrzenności jest tym większe, im stosunek docierających do odbiorcy bocznych do pozostałych. Ze względu na najwyższy poziom dźwięku, odbicia te są najbardziej znaczące w percypowaniu pogłosu. Zjawisko ‘wrażenia przestrzenności’ odczuwane przez osoby badane przez autora publikacji pojawiało się dla symulacji odbić bocznych w zakresie >10ms. Powodowało to ‘poszerzenie się’ źródła dźwięku. Przy zwiększeniu poziomu dźwięku odbicia bocznego wrażenie przestrzenności. Według tego źródła, wpływ odbicia of sufitu ma negatywny (niewielki) wpływ na ‘wrażenie przestrzenności’. Ze względu na ten fakt nie zdecydowano się go implementować.

Według Jota [1], jeśli poszczególne linie opóźniające mają niejednakowy czas zaniku, skutkuje to wyraźnie słyszalnymi składowymi i ujawnia obecność. W celu upewnienia się, że sytuacja taka nie będzie miała miejsca, należy upewnić się, że wszystkie linie mają jednakowy czas zaniknięcia dźwięku. Również [3] zwraca uwagę, iż jedną z fundamentalnych zasad przy tworzeniu sztucznego pogłosu jest zadbanie o to, aby amplituda wszystkich składowych zanikała jednakowo prawie jednakowo szybko. Ma to na celu zapewnienie jednakowego opadania różnych składowych częstotliwościowych zanikającego dźwięku.

Przy jednakowym tłumieniu każdego kolejnego odbicia w linii opóźniającej ma miejsce negatywne zjawisko: im mniejszy czas opóźnienia linii, tym szybciej linia ta znajdzie się poniżej progu amplitudy percypowanej przez odbiorcę. Po zaniknięciu linii o krótkich opóźnieniach aktywne zostają tylko linie o długich czasach opóźnienia, skutkujące słyszalnymi dyskretnymi odbiciami w późnej fazie pogłosu. W celu spełnienia warunku dotyczącego jednakowego tłumienia linii opóźniających w czasie zastosowano znacznie mniejsze tłumienie w liniach opóźniających o niskim czasie opóźnienia, niż na liniach o wyższym czasie opóźnienia. *Tutaj napiszę jaka to dokładnie zależność.*

* Tłumienie każdej linii opóźniającej takim samym współczynnikiem
* Zastosowanie zalecanego [3] tłumienia czyli każda linia zanikająca mniej więcej w jednakowym czasie
* Dodatkowo w podrozdziale 5.4 rozważone są różne przypadki tłumienia pierwszych odbić bocznych i ich wpływ na przestrzenności pogłosu, a także analiza zjawiska zaimplementowanego Interaural Level Difference.

Parametr porównawczy: transformacja hilberta, spectral flattness [4] - *przedstawię je na wykresach*

**5.2. Czasy opóźnienia linii opóźniających**

Dobór czasów opóźnienia linii opóźniających nie jest kluczowy, pod warunkiem, że liczby je reprezentujące nie są przez siebie podzielne [1]. Według [5] dobór nieskorelowanych wartości jest niezbędny, aby uniknąć zjawiska ‘flutter echa’ i uzyskać płaską charakterystykę częstotliwościową. Aby uniknąć zmniejszenia gęstości odbić oraz superpozycji, pożądane jest użycie liczb nieproporcjonalnych do siebie [4].

Powyższe fakty prowadzą do wniosku, iż w celu uniknięcia negatywnych, wymienionych wyżej zjawisk, niezbędne jest ograniczenie zbioru liczb reprezentujących czasy opóźnienia do liczb wzajemnie pierwszych.

Rys .. przedstawia obwiednię amplitudy obu przypadków. Rys .. przedstawia widmo obu przypadków.

Według [5] krótkie czasy opóźnienia skutkują większym ubarwieniem dźwięku, jakie ma miejsce w małych pomieszczeniach. Zjawisko takie byłoby nienaturalne w pomieszczeniach o wysokim czasie pogłosu. Według autorów zawartość ubarwień w złożonej sieci nie jest łatwa do oceny, kontrola zawartości tych ubarwień wymaga używania metody prób i błędów. Prawdopodobnie zjawisko to występuje w mniejszym stopniu dla sieci zawierających choć niewielką ilość długich linii opóźniających, jednak wtedy trudniej kontrolować gęstość pogłosu. Wytłumaczenie tego zjawiska proponuje Barron [2] jako interferencję między dźwiękiem bezpośrednim, a opóźnionym o niewielkie wartości, co skutkuje pojawieniem się filtru grzebieniowego. Wskazuje na fakt, iż zjawisko ma miejsce dla opóźnień około 10-50ms, a szczególnie w okolicach 20ms.

Prawdopodobnie zjawisko nazwane ‘zakolorowaniem’ przez autora ma swoje odzwierciedlenie w widmie sygnału. W celu potencjalnej formalizacji tego terminu na rys .. przedstawia się widmo sygnałów z niskimi oraz wysokimi czasami opóźnienia.

Schroeder [4] - czasy opóźnienia w stosunku 1:1.5. Rys .. Porównanie odpowiedzi impulsowej z czasami opóźnienia w tym zakresie i w o wiele szerszym zakresie.

W celu zbadania wpływu doboru czasów opóźnienia na brzmienie pogłosu, dokonano symulacji zjawisk następujących zjawisk.

* Czasy opóźnienia jako liczby losowe,
* Czasy opóźnienia jako liczby losowe wzajemnie pierwsze,
* Czasy opóźnienia zawierające się w zakresie 1:1.5 [4],
* Zwiększenie liczby linii opóźniających o opóźnieniu bliskim 20ms w celu zaobserwowania zmian w widmie przez obecność filtrów grzebieniowych. *Tutaj pogłos powinien się zagęścić*

Parametr porównawczy: transformacja hilberta, spectral flatness [11]

**5.2. Filtracja linii opóźniających**

*Ze względu na obecność materiałów pochłaniających w pomieszczeniu każda linia opóźniająca musi być filtrowana dolnoprzepustowo.*

*D*o testów związanych z filtracją wybrano wersję pogłosu o czasach opóźnienia linii opóźniających będącymi liczbami wzajemnie pierwszymi (Ze względu na fakt *np. uzyskania najbardziej płaskiej charakterystyki częstotliwościowej*)*.*

Schroeder zaproponował powiązanie wartości tłumienia linii opóźniających z ich zawartością częstotliwościową. Miało to na celu odwzorowanie faktu dłuższego czasu pogłosu dla niskich częstotliwości. Dodatkowo, liczba powtórzeń dźwięku przy powstaniu filtru grzebieniowego powstałego przy zsumowaniu dźwięku bezpośredniego z jego kopią przesuniętą o 40ms to 25 [4]. Sytuacja ta powoduje znaczne zagęszczenie ilości odbić w jennostce czasu.

[5] zaproponowali, aby stosować filtr dolnoprzepustowy na wyjściu każdej linii opóźniającej w celu imitacji tłumienia dźwięku przez powietrze. W ich podejściu częstotliwości odcięcia filtrów zależą od czasu opóźnienia konkretnej linii.

*czyli tu są dwie różne rzeczy: tłumienie - filtr i tłumienie - czas opóźnienia*

W tym celu jako jeden ze sposobów implementacji filtracji zastosowano następującą zależność: im wyższy czas opóźnienia linii opóźniającej, tym wyższa częstotliwości odcięcia filtru dolnoprzepustowego.

*W docsie mam tabelkę jak dokładnie oni tłumią. Hmm …?*

Aby pogłos brzmiał naturalnie, pożądane jest, aby charakterystyka częstotliwościowa była płaska, lecz nie zbyt płaska [8]. Ze względu na ten fakt przetestowano także sytuację z zastosowaniem okazjonalnych filtrów pasmowo przepustowych w celu spowodowania charakterystyki mniej płaską.

W celu zbadania rodzaju filtracji na właściwości sygnału zaimplementowano następujące rozwiązania:

* Filtracja dolnoprzepustowa każdej linii opóźniającej - symulacja tłumienia przez powietrze
* Filtracja dolnoprzepustowa o częstotliwości odcięcia tym wyższej, im wyższa wartość opóźnienia linii opóźniającej *(a nie niższej? - bo na końcu zwykle zostają niskie f)*
* Okazjonalne filtry górnoprzepustowe/pasmowe - filtracja niektórych linii opóźniających w celu modyfikacji spektrum sygnału
* Filtracja w zakresie pochłaniania materiałów (Większość materiałów, z których składają się ściany mają największy stopień pochłaniania energii akustycznej w zakresie 500 Hz – 2 kHz [5]).

Jednym z głównych celów testowania różnych sposobów filtracji jest ocena gęstości widma późnego pogłosu. Według Jota [1] istnieją następujące subiektywne sposoby na identyfikację niewystarczającej gęstości widmowej późnego pogłosu:

* Odpowiedź na sygnał impulsowy sygnał zawierać będzie “dzwonienie” poszczególnych składowych
* Odpowiedź na quasi-stacjonarny sygnał będzie zawierała nadmierny poziom niektórych częstotliwości (na przykład na niektórych nutach przy grze na instrumencie).

Dodatkowo na trudność obiektywnej oceny jakości pogłosu wskazują [5]. Autorzy zauważyli, że dobór parametrów filtrów stosowanych na pierwszych odbiciach mocno wpływa na jakość pogłosu, natomiast trudno znaleźć ilościowy parametr pozwalający na obiektywną, liczbową ich ocenę. *W tym artykule 5 są więc pewnie opisane jeszcze jakieś inne rodzaje filtracji.*

" Perhaps a statistical method of choosing the early reflection properties, combined with some perceptually meaningful constraints, can be found."- [5].

*na podstawie tego zdania mogę dobrać jakiś parametr, wykorzystujący losowość + powołanie się na jakiś percepcyjne zjawisko, czy parametr.*

Zgodnie z tym stwierdzeniem...

Ze względu na fakt nieznalezienia obiektywnego parametru przez [5] w celu oceny wpływu filtracji na jakość pogłosu dokonano próby obiektywnej oceny tego zjawiska. Wysunięto także przypuszczenie, iż stwierdzenie [5] o trudności obiektywnej oceny dotyczy także pogłosu jako całość, a nie odnosi się to wyłącznie do pierwszy odbić. Wykorzystując więc to brak aktualnego obiektywnego parametru, oraz wskazówkę w posaci tytatu, zaproponowano porównanie właściwości *całego* pogłosu parametrem … Rys .. przedstawia porównanie ..

Parametry porównawcze: spektrum, transformacja Hilberta

**5.3. Wykorzystanie zjawisk psychoakustycznych/przestrzenność pogłosu**

Według Beranek [6] najważniejszym wyznacznikiem jakości pogłosu jest czas pierwszego odbicia w stosunku do dźwięku bezpośredniego i jest to nawet ważniejsze, czas pogłosu w pomieszczeniu, a optymalna wartość tego parametru to czas poniżej 20ms.

Zostało także stwierdzone [7 – Keet], że stopień wrażenia przestrzenności jest związany ze stopniem niekoherencji sygnałów z obu kanałów.

W celu uniknięcia sytuacji, w której oba kanały mają identyczny czas opóźnienia, zastosowano lekko (5ms) różny czas opóźnienia między kanałami. W przypadku identycznego czasu i różnego poziomu dla obu kanałów, skutkowałoby to jedynie wrażeniem znajdowania się źródła bardziej po lewej lub prawej stronie (Interaural Time Difference).

* Różnica w poziomie pierwszych odbić bocznych w celu potwierdzenia zaobserwowanej w [2] tezy o większej przestrzenności przy wyższym poziomie tych odbić,
* Zastosowanie różnicy czasu opóźnienia między kanałami dla linii opóźniających,
* Zastosowanie różnicy amplitudy pomiędzy kanałami dla linii opóźniających,
* Ze względu na fakt, iż jednym ze sposobów zwiększenia przestrzenności dźwięku jest implementacja niewielkich różnic pomiędzy parametrami pogłosu [7], zdecydowano się na implementację niewielkiej różnicy pomiędzy filtracją (różnica w częstotliwości odcięcia filtru dolnoprzepustowego w granicach 0-5%) odbić dla obu kanałów.

Dodatkowo, przy zastosowaniu różnicy czasu opóźnienia między kanałami, zyskujemy większą gęstość odbić. W przypadku gdy miałoby to miejsce dla wszystkich linii opóźniających, gęstość odbić jest dwukrotnie większa (z pominięciem możliwych interferencji).

Ze względu na fakt powstawania filtra grzebieniowego przy opóźnieniu do 40ms, zastosowano właśnie taką wartość jako maksymalną różnicę czasu opóźnienia między kanałami. Natomiast każde różnice te są różne dla każdego odbicia – skutkuje to uzyskaniem największej gęstości widmowej, dostajemy bowiem różny filtr grzebieniowy dla każdej linii opóźniającej, dzięki czemu nie występują interferencje tych filtrów.

W celu kompensacji wrażenia znajdowania się źródła dźwięku po bardziej po lewej lub prawej stronie, wartości różnicy parametrów (dotyczy to pierwszego odbicia): czasów opóźnienia między kanałami, poziomu oraz filtracji dostosowano tak, aby odnosiło się wrażenie umiejscowienia źródła naprzeciwko słuchacza. Wartości parametrów tych zostały jednak w zakresach zalecanych przez literaturę.

Parametr: koherencja sygnałów [12], spektrum

*Tutaj wykresy z porównaniem obu kanałów.*

**5.4. Synteza późnego ogona pogłosowego**

*Może jakaś literatura będzie w pracy inż., którą dostałem od dr Pluty*

“The remainder, called the *late reverberation*, is so densely populated with echoes that it is best to characterize the response *statistically* in some way” - [8]

[9] - Moorer zaproponował symulację późnego pogłosu jako

* Symulacja późnego pogłosu jako sygnał będący wynikiem mnożenia późnego ogona pogłosowego złożonego z linii opóźniających ze sprzężeniem - z filtrowanym szumem białym o amplitudzie opadającej wykładniczo
* Wykorzystanie filtered velved noise [10] do syntezy późnej fazy pogłosu

**5.5. Analiza zastosowanych rozwiązań i wybór**

W [4] Schroeder zwraca uwagę, że posiadanie przez pogłos płaskiej charakterystyki częstotliwościowej nie jest konieczne. Argumentuje to faktem, iż większość pomieszczeń, w których przebywają ludzie takiej charakterystyki nie posiada. Oznacza to, iż pogłos charakterystyka pogłosu nie musi być płaska żeby pogłos brzmiał naturalnie.

**6. Implementacja docelowego pogłosu na podstawie wybranych rozwiązań**

**6.1. Wprowadzenie (w tym dobór narzędzia)**

Technologia VST popularna i pozwala na...

Jak wspomniano we Wstępie (1) możliwości obliczeniowe i wygoda vs przygotowywanie stanowiska do przeprowadzania testów. Realizacja zjawisk akustycznych w domenie cyfrowej może być jednak trywialna ze względu na konieczność zaawansowanej znajomości tematyki przetwarzania sygnałów cyfrowych oraz języków programowania, a także sposobów implementacyjnych zapewniających wydajność obliczeniową, szczególnie w przypadku konieczności działania algorytmu w czasie rzeczywistym.

Zarówno testowe implementacje elementów pogłosu (rozdział 5), jak docelowea aplikacji zostały zrealizowane z wykorzystaniem Framework’u JUCE w języku C++.   
JUCE to wieloplatformowa..

**6.3. Architektura aplikacji i opis klas stworzonych w języku C++**

**6.5. Połączenie wybranych rozwiązań (i ich modyfikacje) w celu uzyskania docelowego pogłosu**

*W tym podrozdziale*

**8. Podsumowanie i wnioski**

Przedstawione zostały najbardziej popularne podejścia do realizacji elementów sztucznego pogłosu, ich analiza, wady zalety ich stosowania, a także możliwe ich modyfikacje i skutki tych modyfikacji. Przedstawiono także przykładową procedurę zrealizowania sztucznego pogłosu z zastosowaniem wybranych rozwiązań i ich modyfikacjami.

Faktyczna sytuacja, jaka na miejsce w pomieszczeniu jest znacznie bardziej skomplikowana niż zaproponowane rozwiązania i dalsze badania oraz próby implementacyjne są niezbędne. Istnieje także konieczność proponowania innych parametrów pozwalających na obiektywne porównywanie sygnałów pod kątem zjawisk opisanych w rozdziale 5.

**9. Bibliografia**

[1] Jot J. – M., Chaigne A., Digital Delay Networks for Designing Artificial Reverberators, 90th Convetion of Audio Engineering Society, luty 1991

[2] Barron

[3] Schroeder - Colorless Sounding Artificial Reverberation

[4] Schroeder - Natural Sounding Artificial Reverberation

[5] J. Stautner and M. Puckette - Designing Multi-Channel Reverberators

[6] Beranek

*[7]* http://musicweb.ucsd.edu/~trsmyth/space175/space175.pdf

[8] https://www.dsprelated.com/freebooks/pasp/Artificial\_Reverberation.html

[9] Moorer – About this reverberation buisness

[10] V.Välimäki, B. Holm-Rasmussen, B. Alary and H. M. Lehtonen – Late Reverberation Synthesis Using Filtered Velvet Noise

[11] https://librosa.github.io/librosa/generated/librosa.feature.spectral\_flatness.html

[12] https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.signal.coherence.html

… strony *zawierające dokumentację konkretnych klas z JUCE*

*… git*